

相关量测下处理时延的电力系统动态状态更新法

陆子刚^{1,2}, 卫志农^{1,2}, 孙国强^{1,2}, 孙永辉^{1,2}

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098;

2. 河海大学, 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏省南京市 210098)

摘要: 精确的量测系统模型是电力系统动态状态估计准确性的重要保证。利用修正量测协方差矩阵可更准确地表示实际量测系统的特性, 在基于修正协方差的量测模型基础上提出了处理量测时延问题的电力系统动态状态更新法。利用当前动态估计值反推得到时延量测断面下的状态估计值, 通过估计值间的协方差及交叉协方差矩阵计算, 结合当前量测值重新滤波得到状态更新值。IEEE 14 节点算例仿真结果表明, 负荷波动较小时采用该方法对于提高动态估计精度具有一定效果; 负荷波动较大时采用基于状态反推简化模型的动态状态更新法, 能够有效降低动态状态估计值误差, 提高估计精度。

关键词: 相关量测; 时延; 动态状态更新; 动态状态估计; 电力系统

0 引言

电力系统动态状态估计相比于传统的静态估计器, 不仅能够对电网运行状态进行跟踪估计, 还具有预报功能, 可以实现在线安全预警及预防控制等功能, 是一种优越且有广泛应用前景的技术^[1]。

文献[2]首先提出利用 Kalman 滤波算法建立动态估计模型。考虑到电力系统的非线性特性, 广泛采用扩展 Kalman 滤波(EKF)获得最优状态估计值和预测值^[3-6]。迄今为止, 国内外学者提出了诸多改进算法以提高动态状态估计的模型精度和计算效率^[7-11]。传统动态状态估计模型假设量测噪声为彼此不相关的高斯白噪声, 而在实际中, 同一母线的量测量具有相同的信号源, 其数据间必然存在相关性。文献[12]根据各变电站中远动装置电气量的实际关联性, 提出了具有相关性的量测模型, 以获得更准确的量测协方差矩阵, 并应用在静态状态估计中, 提高了最小二乘法的估计精度, 被视为电力系统状态估计中建立精确量测模型的一种有效方法。

量测数据经数据采集与监控(SCADA)系统以各断面集中上报至调度中心, 能量管理系统(EMS)中数据传输交换时会出现部分量测数据传输延时、丢失或交换延时等情况。虽然较小的数据时差引起的误差可在量测误差中处理, 但在数据时差较大的

情况下, 其产生的误差会对状态估计精度造成非常不利的影响^[13-14]。

文献[13]利用均匀分布概率模型线性化处理量测数据的时延问题。文献[14]进一步引入时差补偿因子用以修正时延断面误差, 提高混合量测下状态估计(SE)的精度。文献[15]在 SCADA 系统中基于互联网进行数据交换, 最终进行全网的状态估计, 计算效率、数据支持及可用性高。当前, 在电力系统动态状态估计中研究处理此类不同时序量测数据(OOSM)的方法具有现实意义^[16-17]。量测数据时差会导致动态跟踪结果出现偏差, 降低动态状态估计的精度, 尤其对系统非平稳变化情况下的影响更大。如今, 针对无序测量的一些研究成果已在航空航天、交通监控及目标定位等异步数据处理问题中有所应用^[18-21]。

本文结合实际量测系统特点, 借鉴文献[12]中量测协方差概念, 建立了基于修正量测协方差的 EKF 动态估计模型; 提出了处理时延量测的动态状态更新方法; 在保留当前状态估计量的同时, 重新处理了时延量测的断面数据, 使动态更新结果更符合系统的实时运行状态; 在给出该算法详细推导公式的同时, 通过算例仿真验证了其可行性和有效性。

1 电力系统动态状态估计模型

EKF 理论是电力系统动态状态估计的基础理论, 其对非线性量测方程进行泰勒级数展开并忽略高次项以实现滤波功能。电力系统动态过程线性化

方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为时刻; \mathbf{X}_k 为状态向量; \mathbf{Z}_k 为量测向量; \mathbf{F}_k 为状态转移矩阵; \mathbf{G}_k 为控制向量; \mathbf{H}_k 为量测雅可比矩阵; $\boldsymbol{\omega}_k$ 为模型误差, \mathbf{v}_k 为量测噪声,且 $\boldsymbol{\omega}_k$ 和 \mathbf{v}_k 设定为均值为 0 的正态白噪声序列,两者协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 。

EKF 估计准则是以第 $k+1$ 时刻状态量的估计误差方差阵 $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$ 最小为目标函数。

1) 预测步

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1|k} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \\ \mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{x} 为状态向量。

2) 滤波步

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1|k+1} = \mathbf{x}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k+1|k})) \\ \mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{R}_{k+1}^{-1} \\ \mathbf{P}_{k+1|k+1} = (\mathbf{P}_{k+1|k}^{-1} + \mathbf{H}_{k+1}^T \mathbf{R}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1})^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 为 k 到 $k+1$ 时刻状态量预测误差协方差矩阵; \mathbf{K}_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的增益矩阵。

预测步采用 Holt's 两参数指数平滑法进行状态量预测^[4,6],系统模型矩阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1|k} = \mathbf{a}_k + \mathbf{b}_k \\ \mathbf{a}_k = \alpha \mathbf{x}_{k|k} + (1 - \alpha) \mathbf{x}_{k|k-1} \\ \mathbf{b}_k = \beta (\mathbf{a}_k - \mathbf{a}_{k-1}) + (1 - \beta) \mathbf{b}_{k-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{a}_k 为水平分量; \mathbf{b}_k 为倾斜分量; α 和 β 为平滑参数。

Holt's 两参数指数平滑预报模型是目前常规电力系统动态状态估计预测步中应用最广泛的模型。因此,系统模型矩阵由 Holt's 参数表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_k = \alpha (1 + \beta) \mathbf{A} \\ \mathbf{G}_k = (1 + \beta) (1 - \alpha) \mathbf{X}_{k|k-1} - \beta \mathbf{a}_{k-1} + (1 - \beta) \mathbf{b}_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{A} 为单位矩阵。

2 修正量测协方差矩阵

状态估计中的三相量测量(三相功率及母线电压幅值)由实际量测系统中运动装置获取的各单相量测量(单相电压幅值、电流幅值及电压电流相角差)所构成^[12],即

$$\mathbf{V}_i = \frac{\mathbf{V}_i^A + \mathbf{V}_i^B + \mathbf{V}_i^C}{3} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_i = \sum_f \mathbf{V}_i^f \mathbf{I}_{ij}^f \cos \varphi_i^f \quad (7)$$

$$\mathbf{Q}_i = \sum_f \mathbf{V}_i^f \mathbf{I}_{ij}^f \sin \varphi_i^f \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{ij} = \sum_f \mathbf{V}_i^f \mathbf{I}_{ij}^f \cos \varphi_{ij}^f \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_{ij} = \sum_f \mathbf{V}_i^f \mathbf{I}_{ij}^f \sin \varphi_{ij}^f \quad (10)$$

式中: \mathbf{V}_i 、 \mathbf{P}_i 、 \mathbf{Q}_i 、 \mathbf{P}_{ij} 、 \mathbf{Q}_{ij} 分别为三相量测量; \mathbf{V}_i^f 为对应 f 相及节点 i 的电压幅值量测, f 取 A, B, C; \mathbf{I}_{ij}^f 和 φ_{ij}^f 分别为对应 f 相及支路 ij 上的电流幅值和电压电流相角差量测; \mathbf{I}_i^f 和 φ_i^f 分别为对应发电机/负荷节点 i 上 f 相的电流幅值和电压电流相角差量测。

由式(6)至式(10)可知,同一母线上的各单相量测误差直接关联所有相关的三相量测。因此,传统动态状态估计中量测量彼此不相关的假设不再适用。式(3)中的 \mathbf{R} 不再为各量测量方差的对角阵,而应由表征各三相量测的修正量测协方差矩阵替代。

利用文献[22]中方法逐一计算各母线上修正量测协方差子矩阵,单相量测向量 \mathbf{p} 和三相量测向量 \mathbf{y} 分别为:

$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_l, \dots, p_\eta]^T = [\mathbf{V}_i^f, \mathbf{I}_i^f, \varphi_i^f, \mathbf{I}_{ij}^f, \dots, \mathbf{I}_{in}^f, \varphi_{ij}^f, \dots, \varphi_{in}^f]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_q, \dots, y_v]^T = [\mathbf{V}_i, \mathbf{P}_i, \mathbf{Q}_i, \mathbf{P}_{ij}, \dots, \mathbf{P}_{in}, \mathbf{Q}_{ij}, \dots, \mathbf{Q}_{in}]^T \quad (12)$$

式中: η 和 v 分别为 \mathbf{p} 和 \mathbf{y} 的维数; n 为节点个数。

修正量测协方差子矩阵中的元素为:

$$\mu_{\mathbf{Y}_\rho^\gamma}^\gamma = E(\mathbf{Y}_\rho^\gamma) \approx \sum_{l_1=1}^n \sum_{l_2=1}^2 \frac{1}{2\eta} (\mathbf{Y}_\rho(l_1, l_2))^\gamma \quad (13)$$

$$c_{\mathbf{Y}_\rho \mathbf{Y}_\rho'} = E(\mathbf{Y}_\rho \mathbf{Y}_\rho') \approx \sum_{l_1=1}^n \sum_{l_2=1}^2 \frac{1}{2\eta} (\mathbf{Y}_\rho(l_1, l_2) \mathbf{Y}_\rho'(l_1, l_2)) \quad (14)$$

式中: $\mu_{\mathbf{Y}_\rho^\gamma}^\gamma$ 为 \mathbf{Y}_ρ 的第 γ 阶非交叉矩; $c_{\mathbf{Y}_\rho \mathbf{Y}_\rho'}$ 为 \mathbf{Y}_ρ 和 \mathbf{Y}_ρ' 的二阶非交叉矩。

$\mathbf{Y}_\rho(l_1, l_2)$ 需计算 2η 次,即

$$\mathbf{Y}_\rho(l_1, l_2) = \mathbf{F}_\rho(\mu_{\rho_1}, \mu_{\rho_2}, \dots, \mu_{\rho_{l-1}}, p_{l,k}, \mu_{\rho_{l+1}}, \dots, \mu_{\rho_n}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} p_{l,1} = \mu_{\rho_l} + \sqrt{\eta} \sigma_{\rho_l} \\ p_{l,2} = \mu_{\rho_l} - \sqrt{\eta} \sigma_{\rho_l} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $l_1=1, 2, \dots, \eta$; $l_2=1, 2$; \mathbf{F}_ρ 为式(6)至式(10)的方程表达式; μ_{ρ_l} 和 σ_{ρ_l} 分别为单相量测量 p_l 的均值和标准差。

由式(13)和式(14)求得对角元素和非对角元素分别为:

$$\hat{R}_{\mathbf{Y}_\rho, \mathbf{Y}_\rho} = \sigma_{\mathbf{Y}_\rho}^2 = E(\mathbf{Y}_\rho^2) - E(\mathbf{Y}_\rho)^2 \quad (17)$$

$$\hat{R}_{\mathbf{Y}_\rho, \mathbf{Y}_\rho'} = E(\mathbf{Y}_\rho \mathbf{Y}_\rho') - E(\mathbf{Y}_\rho) E(\mathbf{Y}_\rho') \quad (18)$$

式中: $\hat{R}_{\mathbf{Y}_\rho, \mathbf{Y}_\rho}$ 和 $\hat{R}_{\mathbf{Y}_\rho, \mathbf{Y}_\rho'}$ 分别为修正量测协方差子矩阵的对角元素及非对角元素。

因此,全网络修正量测协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \text{diag}(\hat{\mathbf{R}}_{z,1}, \hat{\mathbf{R}}_{z,2}, \dots, \hat{\mathbf{R}}_{z,n}) \quad (19)$$

式中: $\hat{\mathbf{R}}_{z,1}, \hat{\mathbf{R}}_{z,2}, \dots, \hat{\mathbf{R}}_{z,n}$ 为子矩阵。

3 处理量测时延的状态更新法

若量测断面 z_k 中部分数据出现传输时延而造成 $x_{k+1|k}$ 的预测精度无法保证时,为获得 $x_{k+1|k+1}$ 的可靠预测值,须重新到利用 $x_{k-1|k-1}$ 。但此刻系统状态的预测值和估计值精度都偏低。因此,当断面 z_k 出现时延时,则须对 $x_{k+1|k+1}$ 进行状态更新,以获得准确的动态跟踪值。

动态状态更新法首先对 $k+1$ 时刻的状态估计值进行反推,得到时延断面 k 下的状态反推值,状态反推值的计算公式为:

$$\hat{x}_{k|k+1} = \mathbf{F}_{k|k+1} (\hat{x}_{k+1|k+1} - \mathbf{Q}_{k+1,k} \mathbf{H}_{k+1}' \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{v}_{k+1,k}) \quad (20)$$

式中: \mathbf{H}_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的量测雅可比矩阵; \mathbf{S}_{k+1} 为量测预测协方差,且 $\mathbf{F}_{k|k+1} = \mathbf{F}_{k+1|k}^{-1}$ 。

由于电力系统稳态运行时各状态量的变化较小,式(20)在满足工程精度要求时可用相邻断面下状态量的均值表示,进一步简化为:

$$\hat{x}_{k|k+1}' = \frac{\hat{x}_{k+1|k+1} + \hat{x}_{k-1|k-1}}{2} \quad (21)$$

$k+1$ 时刻下状态预测误差 $\mathbf{v}_{k+1,k}$ 的协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{vv}$ 为:

$$\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{vv} = \mathbf{Q}_{k+1,k} - \mathbf{Q}_{k+1,k} \mathbf{H}_{k+1}' \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{Q}_{k+1,k} \quad (22)$$

式中: \mathbf{S}_{k+1} 为 k 时刻 z_{k+1} 的协方差。

此时, x_{k+1} 和 $\mathbf{v}_{k+1,k}$ 的交叉协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xv}$ 为:

$$\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xv} = \mathbf{Q}_{k+1,k} - \mathbf{P}_{k+1|k-1} \mathbf{H}_{k+1}' \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{Q}_{k+1,k} \quad (23)$$

x_{k+1} 的协方差 $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$ 为:

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k-1} - \mathbf{P}_{k+1|k-1} \mathbf{H}_{k+1}' \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k-1} \quad (24)$$

结合式(22)至式(24)得 x_k 的协方差 $\mathbf{P}_{k|k+1}$ 为:

$$\mathbf{P}_{k|k+1} = \mathbf{F}_{k,k+1} (\mathbf{P}_{k+1|k+1} + \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{vv} - \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xv} - \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xv}) \mathbf{F}_{k,k+1}' \quad (25)$$

k 时刻 z_k 的协方差 \mathbf{S}_k 为:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k+1} \mathbf{H}_k' + \mathbf{R}_k \quad (26)$$

最后,求得 x_{k+1} 与 z_k 的交叉协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz}$ 为:

$$\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz} = (\mathbf{P}_{k+1|k+1} - \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{vv}) \mathbf{F}_{k,k+1}' \mathbf{H}_k' \quad (27)$$

利用 z_k 及 $\hat{x}_{k+1|k+1}$ 更新状态量得:

$$\hat{x}_{k+1|k} = \hat{x}_{k+1|k+1} + \mathbf{W}_{k+1|k} (z_k - \mathbf{h}(\hat{x}_{k+1|k+1})) \quad (28)$$

$$\mathbf{W}_{k+1|k} = \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz} \mathbf{S}_k^{-1} \quad (29)$$

于是,得到 $\hat{x}_{k+1|k}$ 的协方差,即

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{P}_{k+1|k+1} - \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz} \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz'} \quad (30)$$

完整的动态状态更新法推导公式见附录 A,其步骤如下。

步骤 1: 根据已测量到的 $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_{k-1}, \mathbf{Z}_{k+1}$ 及状态预测值和估计值,根据式(20)求得状态反推值,由式(21)求得次优的状态反推值。

步骤 2: 根据式(22)至式(24),分别求得 $k+1$ 时刻下的状态预测误差 $\mathbf{v}_{k+1,k}$ 的协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{vv}$, x_{k+1} 和 $\mathbf{v}_{k+1,k}$ 的交叉协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xv}$ 以及 x_{k+1} 的协方差 $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$ 。

步骤 3: 由步骤 2 的 3 类协方差计算结果,根据式(25)求得 x_k 的协方差 $\mathbf{P}_{k|k+1}$ 。

步骤 4: 根据式(26)求得 k 时刻 z_k 的协方差 \mathbf{S}_k ,同时,在式(23)的基础上,由式(27)求得 x_{k+1} 与 z_k 的交叉协方差 $\mathbf{P}_{k+1,k|k+1}^{xz}$ 。

步骤 5: 利用时延断面量测量 z_k 以及状态反推值 $\hat{x}_{k+1|k+1}$,由步骤 4 的计算结果并根据式(28)、式(29)求得状态更新值 $\hat{x}_{k+1|k}$ 。

步骤 6: 计算得到 $\hat{x}_{k+1|k}$ 的协方差 $\mathbf{P}_{k+1|k}$ 。

4 算例仿真

4.1 仿真环境设置及性能评价指标

为验证本文所提算法的有效性,利用 IEEE 14 节点系统进行数值试验^[23],以潮流计算结果为真值,负荷曲线数据为某电网实际运行时调度中心的 96 点日负荷采样数据。量测数据通过在式(11)中单相量测量上叠加相应的正态分布随机量测误差而形成,其中电压电流幅值量测值的标准差为 1%,电压电流相角差量测值的标准差为 2%。根据式(6)至式(10)计算得到量测相关性下的三相量测值。Holt's 两参数分别为 $\alpha=0.501, \beta=0.02$ ^[6,11]。

本文采用以下评价指标。

1) 量测误差绝对值比 W_{RAE} 为:

$$W_{\text{RAE}} = \frac{\sum_{i=1}^m |\hat{z}_k^i - \bar{z}_k^i|}{\sum_{i=1}^m |z_k^i - \bar{z}_k^i|} \quad (31)$$

式中: $\hat{z}_k^i, \bar{z}_k^i, z_k^i$ 分别为第 i 个量测量在 k 时刻的估计值、真值和量测值。

2) 量测平均绝对误差 W_{AAE} 为:

$$W_{\text{AAE}} = \frac{\sum_{i=1}^m |\hat{z}_k^i - \bar{z}_k^i|}{m} \quad (32)$$

3) 状态量绝对误差 ϵ_k^V 和 ϵ_k^θ 为:

$$\begin{cases} \epsilon_k^V = |\hat{V}_k - \bar{V}_k| \\ \epsilon_k^\theta = |\hat{\theta}_k - \bar{\theta}_k| \end{cases} \quad (33)$$

式中: \hat{V}_k 和 \bar{V}_k 分别为 k 时刻幅值的估计值和真值; $\hat{\theta}_k$ 和 $\bar{\theta}_k$ 分别为 k 时刻相角的估计值和真值。

4.2 量测相关下动态状态估计仿真

传统动态状态估计滤波步中电压幅值及功率量测标准差 $\sigma_i = 0.02$, 且 R 是以 σ_i^2 为对角元素的量测误差方差阵。考虑量测相关性时, 修正量测协方差矩阵 \hat{R} 代替传统协方差对角阵 R , 并以负荷平稳的 30 个断面作为量测量。2 种协方差下的 W_{RAE} 和 W_{AAE} 见表 1。

表 1 2 种协方差下的 W_{RAE} 和 W_{AAE}
Table 1 W_{RAE} and W_{AAE} with different covariances

| 断面 | W_{RAE} | | W_{AAE} | |
|----|-----------|---------|-----------|---------|
| | 传统协方差 | 本文修正协方差 | 传统协方差 | 本文修正协方差 |
| 1 | 0.66 | 0.66 | 0.004 7 | 0.004 7 |
| 2 | 0.60 | 0.36 | 0.004 5 | 0.002 7 |
| 3 | 0.62 | 0.50 | 0.002 3 | 0.001 8 |
| 4 | 0.56 | 0.53 | 0.002 4 | 0.002 3 |
| 5 | 0.59 | 0.46 | 0.004 5 | 0.003 5 |
| 6 | 0.56 | 0.44 | 0.003 6 | 0.002 8 |
| 7 | 0.23 | 0.24 | 0.001 3 | 0.001 3 |
| 8 | 0.37 | 0.37 | 0.003 3 | 0.003 3 |
| 9 | 0.48 | 0.47 | 0.001 9 | 0.001 8 |
| 10 | 0.34 | 0.31 | 0.003 4 | 0.003 1 |
| 11 | 0.60 | 0.44 | 0.003 2 | 0.002 4 |
| 12 | 0.60 | 0.40 | 0.004 1 | 0.002 7 |
| 13 | 0.65 | 0.52 | 0.006 3 | 0.005 0 |
| 14 | 0.76 | 0.54 | 0.006 5 | 0.004 6 |
| 15 | 0.84 | 0.73 | 0.007 6 | 0.006 6 |
| 16 | 0.83 | 0.63 | 0.007 7 | 0.005 9 |
| 17 | 0.57 | 0.59 | 0.002 2 | 0.002 3 |
| 18 | 0.66 | 0.33 | 0.002 2 | 0.001 1 |
| 19 | 0.62 | 0.54 | 0.004 7 | 0.004 1 |
| 20 | 0.95 | 0.61 | 0.002 5 | 0.001 6 |
| 21 | 0.78 | 0.58 | 0.002 7 | 0.002 0 |
| 22 | 0.47 | 0.38 | 0.002 8 | 0.002 3 |
| 23 | 0.57 | 0.48 | 0.004 6 | 0.004 0 |
| 24 | 0.65 | 0.49 | 0.005 6 | 0.004 3 |
| 25 | 0.72 | 0.76 | 0.004 1 | 0.004 3 |
| 26 | 0.54 | 0.42 | 0.003 2 | 0.002 5 |
| 27 | 0.74 | 0.67 | 0.003 6 | 0.003 2 |
| 28 | 0.59 | 0.39 | 0.003 2 | 0.002 1 |
| 29 | 0.51 | 0.39 | 0.003 5 | 0.002 7 |
| 30 | 0.22 | 0.21 | 0.002 6 | 0.002 5 |

表 1 中, 仅在断面 7, 17 和 25 量测相关模型下 W_{RAE} 略高于传统估计的 W_{RAE} , 偏差很小。其余断

面中量测修正协方差下的 W_{RAE} 和 W_{AAE} 均明显低于传统估计。表 1 说明了针对实际量测系统的特性, 与传统量测模型相比, 修正量测协方差下动态状态估计的精度更高。

4.3 动态状态更新仿真

动态状态估计模型中采用修正量测协方差, 在负荷波动较小及较大的情况下模拟系统运行状态, 以 $W_{RAE}, W_{AAE}, \epsilon_k^V$ 和 ϵ_k^θ 为评价指标。

1) 负荷波动较小

每个断面间负荷偏差在 2% 以内, 选取 6 个断面的量测并以第 2 个断面作为时延量测, 仿真分析以传统动态状态估计及本文提出的状态更新法在量测无时延及第 2 断面时延情况下的估计结果相比较, 如表 2 所示。

表 2 负荷波动较小的量测误差
Table 2 Measurement errors with small load fluctuation

| 断面 | W_{RAE} | | | W_{AAE} | | |
|----|-----------|------|------|-----------|---------|---------|
| | 无时延 | 传统方法 | 本文方法 | 无时延 | 传统方法 | 本文方法 |
| 1 | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0.002 9 | 0.002 9 | 0.002 9 |
| 2 | 0.70 | | | 0.005 1 | | |
| 3 | 0.60 | 0.71 | 0.70 | 0.003 9 | 0.005 1 | 0.005 1 |
| 4 | 0.20 | 0.60 | 0.60 | 0.001 0 | 0.003 8 | 0.003 8 |
| 5 | 0.38 | 0.40 | 0.54 | 0.003 4 | 0.003 5 | 0.002 9 |
| 6 | 0.51 | 0.54 | 0.54 | 0.002 0 | 0.002 0 | 0.002 0 |

表 2 中状态更新后的第 3 个断面中 W_{RAE} 降低了 0.01, W_{AAE} 无明显变化, 说明在负荷波动较小时算法对于估计精度的提高有一定效果。由于在状态量变化较小范围内, 预测值 $x_{k+1|k-1}$ 与 $x_{k+1|k}$ 两者间误差很小, 所以此刻的状态更新值变化不大。表 3 和表 4 中, ϵ_k^V 在正常、时延及更新这 3 种情况下误差分布相同, ϵ_k^θ 在更新后的误差分布都集中在 0.002 以内表明相角精度有所提高。

表 3 负荷波动较小时电压幅值绝对误差
Table 3 Voltage magnitude absolute errors with small load fluctuation

| 断面 | 方法 | 各节点对应不同 ϵ_k^V 的分布 | | | | |
|----|---------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0~0.002 | 0.002~0.004 | 0.004~0.006 | 0.006~0.008 | 0.008~0.010 |
| 2 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 有时延(传统) | | | | | |
| | 有时延(本文) | | | | | |
| 3 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 0 | 12 | 2 | 0 | 0 |
| | 更新(本文) | 0 | 12 | 2 | 0 | 0 |
| 4 | 无时延 | 0 | 13 | 1 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 0 | 11 | 3 | 0 | 0 |
| | 更新后(本文) | 0 | 11 | 3 | 0 | 0 |

表 4 负荷波动较小时相角绝对误差

Table 4 Angle absolute errors with small load fluctuation

| 断面 | 方法 | 各节点对应不同 ϵ_k^{θ} 的分布 | | | | |
|----|---------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0~0.002 | 0.002~0.004 | 0.004~0.006 | 0.006~0.008 | 0.008~0.010 |
| 2 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 有时延(传统) | | | | | |
| | 有时延(本文) | | | | | |
| 3 | 无时延 | 5 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 5 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| | 更新(本文) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 更新后(本文) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 2 至表 4 表明在负荷波动较小时状态更新效果对于动态估计精度的有一定改善。同时,时延后第 3 个断面及其之后断面的状态估计值在以上 3 种情况下基本相同,符合状态更新及动态估计的特性。

负荷波动较小时各断面下动态估计值的精度都较高,且预测步中 Holt's 两参数为拟合值,状态转移矩阵非精确模型,因此,对于实时状态预测存在误差,造成反推状态量时产生误差。另外,在动态状态估计精度较高时,过程噪声的累积误差使得状态更新法对估计结果精度的提高存在局限性。

2) 负荷波动较大

每个断面间负荷偏差 8%~10%,仿真条件与负荷波动较小时相同,状态反推值采用式(21)的简化模型。仿真结果如表 5 至表 7 所示。

表 5 中状态更新后的 W_{RAE} 从 0.80 降到 0.40, W_{AAE} 降低了 0.002,表明在负荷波动较大时,采用状态更新方法得到的估计值更接近实际状态值,降低了误差,起到了较好的动态滤波效果。

表 5 负荷波动较大时量测误差

Table 5 Measurement errors with large load fluctuation

| 断面 | W_{RAE} | | | W_{AAE} | | |
|----|-----------|------|------|-----------|---------|---------|
| | 无时延 | 传统方法 | 本文方法 | 无时延 | 传统方法 | 本文方法 |
| 1 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 0.071 6 | 0.071 6 | 0.071 6 |
| 2 | 0.64 | | | 0.051 0 | | |
| 3 | 0.64 | 0.80 | 0.40 | 0.027 1 | 0.034 0 | 0.032 0 |
| 4 | 0.69 | 0.78 | 0.78 | 0.022 1 | 0.024 9 | 0.024 8 |
| 5 | 0.81 | 0.85 | 0.85 | 0.026 2 | 0.027 5 | 0.027 5 |
| 6 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.009 0 | 0.009 2 | 0.009 2 |

表 6 和表 7 中, ϵ_k^V 和 ϵ_k^{θ} 的误差分布在状态更新后明显改善, ϵ_k^V 中 9 个节点的电压幅值误差都提高了 0.002, 中 13 个节点的相角误差都显著提高, 从高于 0.008 降低到 0.002 以内。由此可见, 负荷波动较大时状态更新方法在处理量测时延的问题上能够起到较好的动态滤波效果。

表 6 负荷波动较大时电压幅值绝对误差

Table 6 Voltage magnitude absolute errors with large load fluctuation

| 断面 | 方法 | 各节点对应不同 ϵ_k^V 的分布 | | | | |
|----|---------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0~0.002 | 0.002~0.004 | 0.004~0.006 | 0.006~0.008 | 0.008~0.010 |
| 2 | 无时延 | 1 | 3 | 6 | 4 | 0 |
| | 有时延(传统) | | | | | |
| | 有时延(本文) | | | | | |
| 3 | 无时延 | 0 | 0 | 2 | 12 | 0 |
| | 时延后(传统) | 0 | 0 | 2 | 3 | 9 |
| | 更新(本文) | 0 | 0 | 2 | 12 | 0 |
| 4 | 无时延 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| | 更新后(本文) | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 |

表 7 负荷波动较大时相角绝对误差

Table 7 Angle absolute errors with large load fluctuation

| 断面 | 方法 | 各节点对应不同 ϵ_k^{θ} 的分布 | | | | |
|----|---------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 0~0.002 | 0.002~0.004 | 0.004~0.006 | 0.006~0.008 | 0.008~0.010 |
| 2 | 无时延 | 4 | 3 | 5 | 2 | 0 |
| | 有时延(传统) | | | | | |
| | 有时延(本文) | | | | | |
| 3 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 1 | 0 | 0 | 0 | 13 |
| | 更新(本文) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 无时延 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 时延后(传统) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 更新后(本文) | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 8 给出了在同一仿真环境下本文方法与前后断面计算时间的比较。

表 8 动态状态更新法与传统方法的计算时间

Table 8 Calculation time of dynamic state updating method and traditional method

| 情况 | 断面 1 计算时间/s | 断面 2 计算时间(无时延)/s | 断面 3 计算时间/s | | 断面 4 计算时间/s |
|-----|-------------|------------------|-------------|----------|-------------|
| | | | 无时延(传统) | 本文 | |
| 未稀疏 | 0.052 20 | 0.049 60 | 0.053 00 | 0.169 90 | 0.050 70 |
| 稀疏 | 0.007 45 | 0.006 03 | 0.007 98 | 0.014 26 | 0.006 22 |

表 8 中, 断面 3 采用本文方法未稀疏化时的用时是传统方法的 3.21 倍, 稀疏后减少为 1.79 倍, 增加的时间即为状态更新法的额外用时。由此可见, 本文方法的耗时相比传统方法(EKF)在稀疏后大约增加了后者的一次迭代时间, 能够满足计算效率的要求。

负荷波动较大时采用式(21)简化模型较好地避免了预测步误差导致反推值的不精确, 这是因为在式(20)中, 状态转移矩阵逆矩阵由精确推导公式计算时, 由于 Holt's 两参数为常数, 无法精确表征状态实时变化趋势, 使得逆矩阵计算存在较大误差。而简化模型实际上在时延断面时刻设定了状态量中

间值,较好地避免了反推值出现较大的偏差,对在负荷波动较大时状态量的明显变化下尤为有效。

5 结语

本文提出了一种相关量测下处理时延的电力系统动态状态更新法。在动态状态估计模型中采用修正量测协方差矩阵,更符合实际量测系统的特性。利用动态状态更新法并根据量测时延数据对当前动态状态估计值进行更新,能够提高状态估计值及量测估计值的精度,在负荷波动较小时有一定效果,在负荷波动较大时采用状态反推简化模型,有效降低了状态更新后估计结果的误差。经算例测试表明,本文提出的相关量测下状态更新方法对动态状态估计预估能力准确性的提高切实有效。

负荷波动较大时采用状态反推简化模型是一种次优估计方法,为了更精确地获得电力系统状态实时跟踪值,对动态估计预测步时变参数的精确辨识是今后需要深入开展的工作。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] SHIVAKUMAR N R, JAIN A. A review of power system dynamic state estimation techniques [C]// Power System Technology and IEEE Power India Conference, October 12-15, 2008, New Delhi, India: 1-6.
- [2] DEBS A S, LARSON R E. A dynamic estimator for tracking the state of a power system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7): 1670-1678.
- [3] 张伯明,王世缨,相年德.电力系统实时运行的状态估计和预报[J].中国电机工程学报,1991,11(增刊1):68-74.
ZHANG Boming, WANG Shiyong, XIANG Niande. Estimation and forecasting of real-time power system operation states[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(Supplement 1): 68-74.
- [4] 韩力,韩学山,陈芳.基于综合预测和自适应滤波器的电力系统动态状态估计[J].电工技术学报,2008,23(8):107-113.
HAN Li, HAN Xueshan, CHEN Fang. Dynamic state estimation in power system based on integrated forecasting model and adaptive filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 107-113.
- [5] DO COUTTO FILHO M B, SOUZA J C S. Forecasting-aided state estimation-part I and II[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1667-1685.
- [6] 李大路,李蕊,孙元章.混合量测下基于UKF的电力系统动态状态估计[J].电力系统自动化,2010,34(17):17-21.
LI Dalu, LI Rui, SUN Yuanzhang. Power system dynamic state estimation with mixed measurements based on UKF [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 17-21.
- [7] 卫志农,孙国强,庞博.无迹卡尔曼滤波及其平方根形式在电力系统动态状态估计中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(16):74-80.
WEI Zhinong, SUN Guoqiang, PANG Bo. Application of UKF and SRUKF to power system dynamic state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 74-80.
- [8] 常乃超,王彬,何光宇,等.以测点正常率最大为目标的状态估计改进算法[J].电力系统自动化,2014,38(11):62-67.
CHANG Naichao, WANG Bin, HE Guangyu, et al. An improved algorithm for state estimation based on maximum normal measurement rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 62-67.
- [9] 丁宏恩,高宗和,苏大威.混合量测状态估计相角参考点坏数据问题的处理方法[J].电力系统自动化,2014,38(9):132-136.
DING Hongen, GAO Zonghe, SU Dawei. Solution to bad data problem of phase angle reference bus for state estimation with hybrid measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 132-136.
- [10] ROBSON C P, LAMINE M, FLAVIO A B L. Constrained robust estimation of power system state variables and transformer tap positions under erroneous zero-injections[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(3): 1144-1152.
- [11] 顾锦文.对有关标准中关于状态估计的一些不同意见[J].电力系统自动化,2014,38(1):134-135.
GU Jinwen. Disagreements discussion on state estimation in related standards[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 134-135.
- [12] CARO E, CONEJO A J, MINGUEZ R. Power system state estimation considering measurement dependencies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1875-1885.
- [13] 赵红嘎,薛禹胜,高翔,等.量测量的时延差对状态估计的影响及其对策[J].电力系统自动化,2004,28(21):12-16.
ZHAO Hongga, XUE Yusheng, GAO Xiang, et al. Impacts of the difference between measurement transmission delays on state estimation and the countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 12-16.
- [14] 顾全,陈根军,陈松林,等.量测数据时差补偿状态估计方法[J].电力系统自动化,2009,33(8):44-47.
GU Quan, CHEN Genjun, CHEN Songlin, et al. A novel state estimation method considering measurement time-delay compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 44-47.
- [15] SUC L, LU C N, HSHAO T Y. Simulation study of internet based inter control center data exchange for complete network modeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1177-1183.
- [16] SU C L, LU C N. Interconnected network state estimation using randomly delayed measurements [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 870-878.
- [17] HILTON R D, MARTIN D A, BLAIR W D. Tracking with time delayed multisensor systems [M]. Dahlgren: Naval Surface Warfare Center, 1993.
- [18] BAR-SHALOM Y. Update with out-of-sequence measurements in tracking: exact solution[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 769-777.
- [19] MATVEEV A, SAVKIN A. The problem of state estimation via asynchronous communication channels with irregular transmission times [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(4): 670-676.
- [20] ZHOU Wenhui, LI Lin, CHEN Guohai, et al. Optimality analysis of one-step OOSM filtering algorithms in target tracking[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2007, 50(2): 170-187.
- [21] 王伟,黄心汉,王敏.无量量测滤波更新算法综述[J].控制与决

策, 2012, 27(1): 1-7.

WANG Wei, HUANG Xinban, WANG Min. Survey of sequence measurement filtering algorithm [J]. Control and Decision, 2012, 27(1): 1-7.

[22] CARO E, MORALES J M, CONEJO A J, et al. Calculation of measurement correlations using point estimate [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2010, 25(4): 2095-2103.

[23] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability [M]. Ames, Iowa: The Iowa State University Press, 1977: 37-39.

陆子刚(1984—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统运行分析与控制。E-mail: njluzigang@163.com

卫志农(1962—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化。E-mail: wzn_nj@263.net

孙国强(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统运行分析与控制。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

(编辑 王梦岩 章黎)

Power System Dynamic State Updating Method in Processing Time Delay with Correlated Measurement

LU Zigang^{1,2}, WEI Zhinong^{1,2}, SUN Guoqiang^{1,2}, SUN Yonghui^{1,2}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Accurate modeling of the measurement system is an important guarantee for the precision of power system dynamic state estimation (DSE). The modified measurement covariance matrix is used to represent the characteristics of the actual measuring system more accurately. In the model based on the modified measurement covariance matrix, the method of power system dynamic state updating used to handle the time-delay measuring problem is proposed. The current dynamic state estimate is used to obtain the state estimate reversedly under the delayed measurement cross section. Through the calculation of covariance and cross-covariance matrix among the estimates, the current state is updated by filtering based on the current measurement. Simulation results on the IEEE 14-bus system show that the dynamic state updating method is of definite effect in increasing the precision of DSE during small load fluctuation, while, the errors of updated state estimate are reduced obviously by using the dynamic state update method based on state-reversed simplified model during large load fluctuation with contribution to the precision of DSE. The simulation results have verified the effectiveness of the proposed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052, No. 51107032, No. 61104045).

Key words: correlated measurements; time delay; dynamic state updating; dynamic state estimation; power system

《Journal of Modern Power Systems and Clean Energy (MPCE)》 “电能质量”专辑征稿启事

电能质量是实现智能电网与节能减排的重要制约因素。随着科学技术和国民经济的高速发展,电力系统、冶金、化工、电气化铁路以及家用电器等冲击性、非线性负荷不断增多,它们使得谐波、电压波动闪变、三相不平衡等传统电能质量问题更加恶化,同时,输出功率随机波动的新能源接入进一步恶化了电网频率偏差、电压波动与闪变;另一方面,基于计算机系统和电子装置等一类敏感性负荷所占的比重也日益增大,这些负荷对电能质量的稳态指标要求严格,越来越严重的谐波污染与越来越高的电能质量要求形成了一对日趋尖锐的矛盾。

电能质量问题已经与电力系统的安全可靠性紧密联系起来,改善电能质量对于电网和电气设备的安全、经济运行具有重要的意义。《Journal of Modern Power Systems and Clean Energy (MPCE)》将“电能质量”作为重要选题方向策划专题,邀请湖南大学罗安教授、丹麦奥尔堡大学 Josep M. Guerrero 教授共同担任本专题特约主编,诚邀国内外专家学者共同探讨,各抒己见,旨在引起各方面对此问题的兴趣和关注。

专题征稿范围包括但不限于以下方面:电能质量发展的规划、动态、标准、趋势;智能电网领域、分布式发电和微电网领域、配用电侧、牵引系统、电动汽车领域等电能质量问题及解决方案;电能质量经济分析、节能减排作用分析、应用情况及工程案例;电能质量的监测、分析、综合评估技术与方法;电能质量的典型问题(谐波、无功、不平衡、暂降等)分析及控制、优化与协调、综合治理技术与方法;新型电能质量控制装置的原理、控制方法、设计与制造技术以及应用方法;电能质量标准、电能质量管理等进展、方法、应用。

投稿指南:请在以下网站在线投稿: <http://www.mpce.info> 或 <http://www.springer.com/40565>

论文投稿截止日期:2015-06-30;通知录用日期:2015-09-30~2015-11-30;出版日期:2016-01。

联系信息:江苏省南京市江宁区诚信大道19号,国网电力科学研究院期刊中心,邮编211106。

Tel: +86 25 81093061; Fax: +86 25 81093040

E-mail: mpce@alljournals.cn